

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12501  
研究種目：挑戦的萌芽研究  
研究期間：2014～2014  
課題番号：26610057  
研究課題名(和文) 光ファイバーを用いたチェレンコフ検出器の開発

研究課題名(英文) Development of Fiber Cherenkov Counters

## 研究代表者

河合 秀幸 (KAWAI, Hideyuki)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60214590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー素粒子実験では荷電粒子の種類を識別する測定器が必要である。低いエネルギー領域では速度を測定するTime of Flight測定器などが有効であるが、粒子速度が真空中の光速の99%以上の高エネルギー領域では粒子間の速度差が小さくなるためTOF測定器では十分な粒子識別効率が得られない。高エネルギー領域で最も有効な粒子識別装置はチェレンコフカウンターである。本研究では輻射体に透明光ファイバーケーブルを用いた2種類のチェレンコフカウンター(チェレンコフ発光の有無を測定するしきい値型と伝播時間を計測するTOP型)を新規に開発し、しきい値型では十分な粒子識別能力があることを証明した。

研究成果の概要(英文)：Particle identification detectors are essentially needed in elementary particle experiments. The TOF (Time of Flight) measurements are effective in low energy region but they are not effective in high energy region in which the velocities of charged particles are higher than 0.99c. Only the Cherenkov counters have enough PID efficiencies in such high energy region. We have developed two types of new Cherenkov counters with clear light fibers for radiator. One is a threshold type, and the other is a propagation time measurement type. We have measured the particle identification efficiencies with positron beam at Research Center of Electron Photon Science, Tohoku University. The PID efficiency for TOP detector is not enough but that for threshold type detector is still enough.

研究分野：素粒子実験

キーワード：放射線測定器 粒子識別装置 チェレンコフカウンター 光ファイバー しきい値型 伝播時間測定

## 1. 研究開始当初の背景

高エネルギー素粒子実験では素粒子反応によって生成した粒子の質量を決定する必要がある。粒子の運動量は磁場中の粒子軌道の曲率半径の測定によって得られるので、速度や運動エネルギーなどの運動量とは独立した物理量を測定すれば、粒子の質量が決定できる。このような測定器を粒子識別装置という。

粒子識別装置の中には粒子の速度を直接測定する TOF (Time of Flight) 測定器や物質中で発生した 2 次電子などの量を測定するエネルギー損失測定器などがある。但しこれらの粒子識別法は、対象粒子の運動量が大きくなると飛行時間差やエネルギー損失の差が小さくなり、粒子識別効率が低下する。標準的な高エネルギー素粒子実験では  $\gamma$  / K が 99% 以上の効率で識別できるのは TOF 法では運動量がおおむね 1.2 GeV/c 以下、エネルギー損失法では 0.7 GeV/c 以下である。高運動量領域で有効な粒子識別装置はチェレンコフカウンターだけである。

チェレンコフカウンターにはチェレンコフ発光の有無を測定するしきい値型とチェレンコフ光の方向の情報を測定する差動型がある。差動型の中にはチェレンコフ光の伝播時間を測定する TOP (Time of Propagation) 測定器がある。

我々はこれまで高エネルギー素粒子実験におけるチェレンコフカウンターの開発研究を行ってきた。とりわけチェレンコフ放射体として任意屈折率が得られるシリカエアロゲルに関する研究は世界中で最高レベルであり、高エネルギー加速器研究機構の電子陽電子衝突実験 belle/belle2 を始めとして大強度陽子加速器 J-PARC における数多くの共同利用実験、高輝度光科学研究センター Spring-8 における高エネルギー線ビーム実験 LEPS/LEPS2、東北大学電子光物理学研究センターにおける高エネルギー線ビーム実験 FOREST などにシリカエアロゲルやそれを用いたチェレンコフカウンターを製造し提供している。

FOREST では既存の放射線測定器(その大部分は線カロリメーター)で囲まれた空間に粒子識別装置を設置しなければならない。放射体を置く空間は十分あるがこの空間はほぼ完全に包囲されていて、わずかに幅 1cm 程度の隙間しか残されていない。この空間の下流側にも線スペクトロメーターが設置されているため、この空間内に物質の多い光電子増倍管を設置することができない。チェレンコフ光は光ファイバーによってこの隙間を通して外部に設置した光電子増倍管に導くという方法をとらざるを得ない。また LEPS2 も同様の実験条件であり、チェレンコフ放射体の近傍に光電子増倍管を置く事ができない。

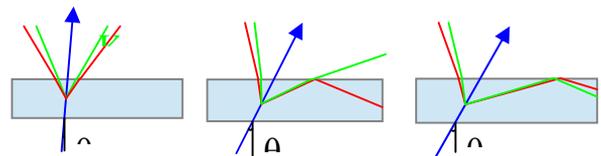
光ファイバーは一般に 2 重構造で、中心部分(以後コアと表記する)の屈折率が表面部

分(以後クラッドと表記する)よりわずかに屈折率が高く、光はコアとクラッドの境界面での全反射によって伝播する。このためファイバー端面に入射した光のおおむね 10% だけが全反射条件を満足する。このため何らかの放射体で発生したチェレンコフ光を光ファイバーに入射させて伝播させるという方法では厚い放射体が必要となり、やはり質量の制限を満たすことができなくなる。

以上のように、密閉空間に設置するチェレンコフカウンターを検討している中で、光ファイバー自身をチェレンコフ放射体とするアイデアが浮かんだ。光ファイバーの方向をチェレンコフ光が効果的に全反射条件を満たす方向に置けば、チェレンコフ放射体の物質量を最小にできるので、光ファイバーでチェレンコフ光を遠方に伝播させる方式では物質最小のチェレンコフカウンターとなる。このような透明光ファイバー自身を放射体としたチェレンコフカウンターは高エネルギー素粒子実験では過去に例がない。このため本研究ではこのような独創的なチェレンコフカウンターの開発研究を提案した。

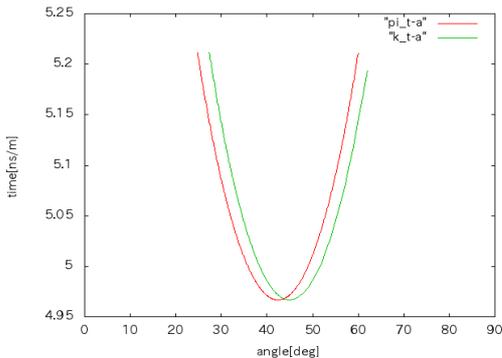
## 2. 研究の目的

本研究で提案する光ファイバーチェレンコフカウンターの原理を下図で示す。チェレンコフ光のコアとクラッドの境界面での振舞いを示しており、赤線が  $\gamma$ 、青線が K のチェレンコフ光である。簡単のためクラッドと空気の間での振舞いは示していない。



本研究では(株)三菱レイヨン製の光ファイバーケーブル「エスカ」を使用した。屈折率はコアが 1.49、クラッドが 1.42 である。運動量 1 GeV/c の  $\gamma$  または K 中間子が入射する。これらの速度は真空中での光速のそれぞれ 0.990 倍と 0.897 倍であり、コアで発生するチェレンコフ光の方向は粒子進行方向に対して 47.3 度と 41.5 度である。左図は荷電粒子がファイバーに対して垂直に近い角度で入射した場合であり、 $\gamma$  / K いずれの場合も全てのチェレンコフ光はクラッド層に抜けている。入射角度を斜めにするると中図のように K では引き続き全てのチェレンコフ光が抜けてしまうが  $\gamma$  では一部のチェレンコフ光が全反射条件を満たすためファイバー右端に向かって全反射で伝播する。この場合は右端に受光素子を接着しておけばしきい値型チェレンコフカウンターとなる。さらに入射角度を傾けると K でも全反射で伝播するチェレンコフ光が現れる。 $\gamma$  のチェレンコフ光のほうが伝播時間が短いので TOP カウンターとして利用できる。通常の TOP カウンタ

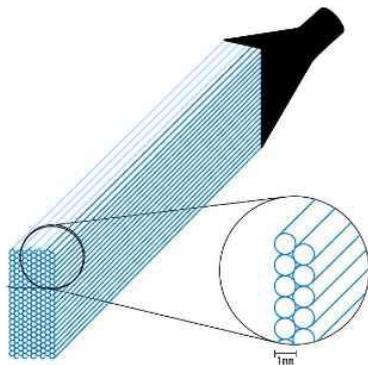
ーはクォーツ結晶の板を使用するので高価である。また表面研磨の状況にも依存するが伝播距離は 2~3m 程度しか取れない。光ファイバーはカタログに記載された減衰長が 40m 以上なので、十分な伝播距離を取れるため TOP 時間差が大きくなる。



上図は入射角度と 1m 当たりの伝播時間である。入射角度が  $\pi$  では 24~59 度で、K では 29~64 度で全反射が起きている。入射角度が 24~29 度と 59~64 度ならばきい値型チェレンコフカウンターとなる。また入射角度が 30 度では 1m 当たりの伝播時間差が 51psec であり、長さ 40m のファイバーを用いれば 2nsec 以上の伝播時間差となる。距離 3m の TOF 飛行時間差が 0.75nsec なので、この TOP カウンターは TOF 計測より高性能な粒子識別法となる可能性がある。

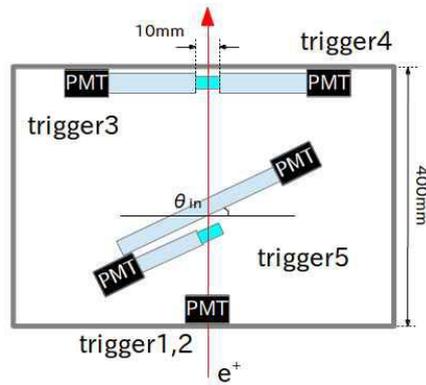
### 3. 研究の方法

本研究では直径 1mm のエスカファイバーを使用し、下図のように長さ 50m のファイバーを 20 本 x 10 層に束ねた。



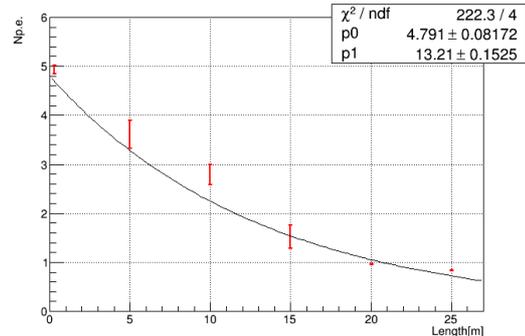
この他にも様々なファイバー束を製作したが、次で述べる性能評価実験に使用した束は全てこの束である。

性能評価実験は 2014 年 12 月 22~24 日に東北大学電子光理学研究センターの GeV 実験室における 500MeV 陽電子ビームで行った。実験装置のレイアウトを次図に示す。



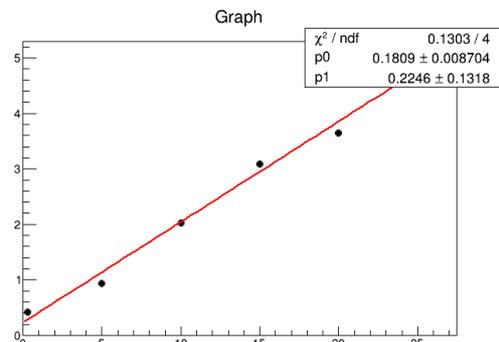
陽電子ビームを限定するトリガーシンチレーターは 10mm x 10mm x 10mm のシンチレーターを 3 個使用した。暗箱の上流側には垂直方向両覗き（光電子増倍管の名称が trigger1 と trigger2）暗箱の下流側には水平方向両覗き（光電子増倍管の名称が trigger3 と trigger4）そして光ファイバー束の直前には片覗きの trigger5 を設置した。Trigger1~4 の 4 本の光電子増倍管の時間情報の平均値を時間原点とした。

最初にチェレンコフ光量の伝播長依存性を測定した。e<sup>+</sup>の入射角度は 30 度である。



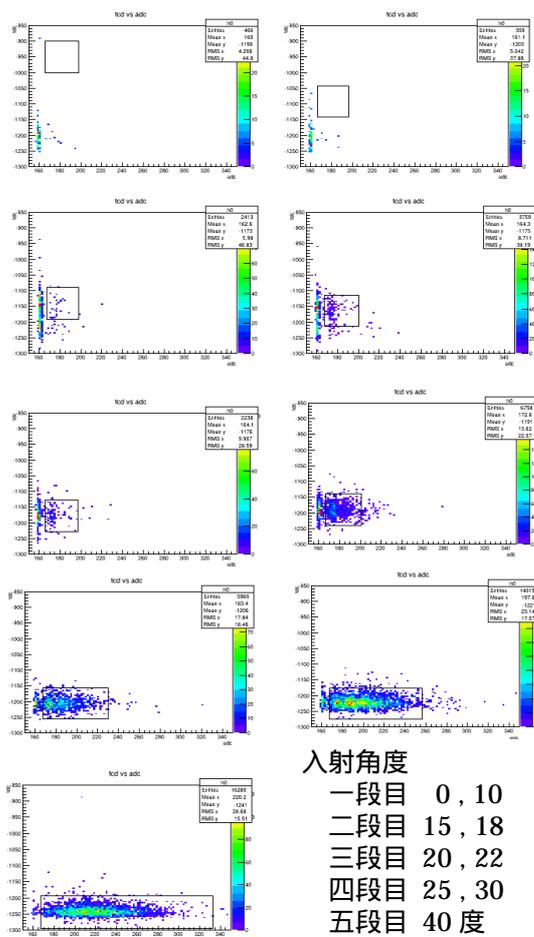
エスカのカタログでは昼色光に対する減衰は 200Bq/km すなわち半減長が 30m（減衰長 43m）となっているが、この測定では減衰長は 13.21m である。これは、チェレンコフ光量の波長依存性が波長の 2 乗に反比例して短波長成分が多いので、エスカでは短波長光の減衰長が小さいことが考えられる。

次に時間分解能の伝播長依存性を測定した。



横軸は伝播長で単位は m、縦軸は時間分解能で単位は n sec である。結果は非常に残念なことに、時間分解能は伝播距離に比例して悪化している。これでは大きな伝播距離が取れるという光ファイバー-TOP カウンターのメリットを生かすことが全くできない。光ファイバー内での光の減衰は吸収ではなく、コアとクラッドの境界面における全反射の反射角度が微妙に変化することに依ると思われる。チェレンコフ光は方向の情報が徐々に失われてゆくと思われる。

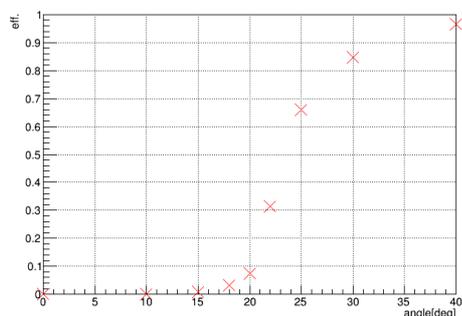
最後に、伝播長を 10m に固定し、様々な入射角度で光量と時間の分布を測定した。



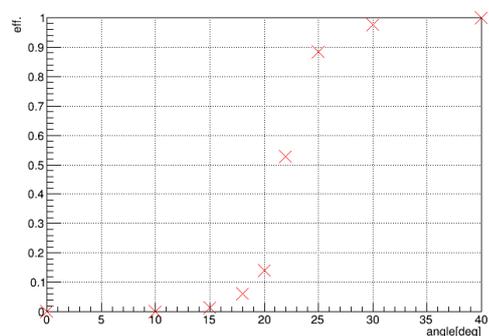
これらの図は横軸が ADC、縦軸が TDC の値である。図中の囲いは信号領域を示しており、ADC では光電子数 0.5 個に相当する ADC 値から分布のピーク値の 3 倍まで、TDC では光電子増倍管まで最も早く到達するであろうチェレンコフ光の予想到達時刻  $\pm 50$ channel を示している。22 度以下の場合には最も早く到達するであろうチェレンコフ光はコアとクラッドの境界面では全反射できないが、クラッドと外部空気との境界面で全反射した場合の到達時刻で示している。これらの測定結果からクラッドと外部との境界面で全反射したチェレンコフ光の一部も光電子増倍管まで到達している。また 10 度以下ではコアとクラッドの境界面で全反射したと思われる光が観測されている。これは knock-on 2 次電子が作ったチェレンコフ光と考えること

ができる。

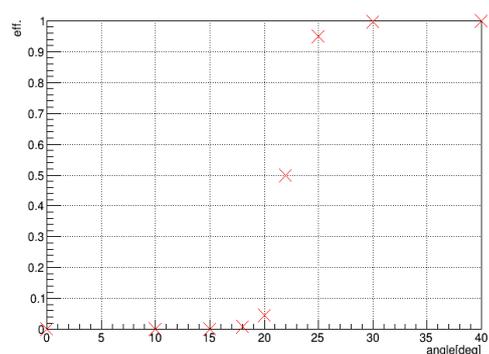
チェレンコフ光の検出効率の入射角度依存性を下図に示す。



この測定器は 25 ~ 30 度で光量が少なくて検出効率が十分ではない。そこでこの測定器を 2 層重ねて 1 層以上が反応した場合を hit と判定する測定器を考える。この 2 層測定器の予想検出効率は以下ようになる。



さらに、この測定器 1cm を 5 層重ねて、2 層以上が反応した場合を hit と判定した場合の予想検出効率は以下ようになる。



この測定器は荷電粒子入射角度が 20 度から 25 度へ変化する間に検出効率が 5% 以下から 95% 以上へ変化しており、しきい値型チェレンコフカウンターとして必要最小限度の粒子識別効率を持つと言える。

#### 4. 研究成果

本研究では透明光ファイバーをチェレンコフ放射体とした他に類のない新しいチェレンコフカウンターの可能性を研究した。研究開始前に期待していた長い propagation length を持つ TOP カウンターとしては不十分な性能しか得られなかった。これは現在の光ファイバーの製造法に起因すると考えら

れる。一方しきい値型チェレンコフカウンタ  
ーとしては必要十分な粒子識別効率を持つ  
粒子識別装置が可能であることが判明した。  
この装置は輻射体を任意形状にすることが  
用意であり、光電子増倍管は輻射体から遠く  
離れた位置に設置できるため、従来方法では  
粒子識別装置設置不可能であった実験条件  
でも有効となる場合が存在する。高エネルギー  
素粒子実験において特徴ある新規の粒子  
識別装置が開発できたと言えよう。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に  
は下線)

[雑誌論文](計 0件)

[学会発表](計 1件)

#### **Development of a Clear Fiber Cherenkov Counter**

N. Kaneko, S. Han, H. Ito, H. Kawai, A.  
Kobayashi, S. Kodama

Advancements in Nuclear Instrumentation  
Measurement Methods and their Applications,  
**218**,

Apr. 20-24 2015, Lisbon Convention Center,  
Portugal

[図書](計 0件)

[産業財産権]

本研究は高エネルギー素粒子実験における  
新規粒子識別装置の開発研究であり、研究成  
果は広く社会に公開すべきであると考えら  
るので、本研究に直接関係する特許は出願し  
ない。だが、本研究実施中に本研究に関連  
する光ファイバーを用いた3件の新規商用放  
射線測定器を開発した。

出願状況(計 3件)

名称：放射性物質測定器  
及び放射性物質測定方法  
リアルタイム <sup>90</sup>Sr 測定器

発明者：河合 秀幸

権利者：千葉大学

種類：特許

番号：特願 2014-213331

出願年月日：平成 26 年 11 月 17 日

国内外の別：国内

名称：PET 装置及び  
PET 装置用放射線検出器  
高性能低価格な PET 用 線検出器

発明者：河合 秀幸

権利者：千葉大学

種類：特許

番号：特願 2015-006569

出願年月日：平成 27 年 1 月 16 日

国内外の別：国内

名称：がん診断装置及びがん診断方法  
消化器がん診断用の PET 陽電子測定器

発明者：河合 秀幸

権利者：千葉大学

種類：特許

番号：特願 2015-036786

出願年月日：平成 27 年 2 月 26 日

国内外の別：国内

取得状況(計 0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

取得年月日：

国内外の別：

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

河合 秀幸 (KAWAI Hideyuki)

千葉大学 大学院理学研究科 准教授

研究者番号：60214590

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：